
Adaptive Control of Surface Finish in Automated Turning Processes

E. García-Plaza⁽¹⁾, P.J. Núñez⁽¹⁾, A.R. Martín⁽¹⁾, A. Sanz⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad de Castilla-La Mancha. E.T.S. de Ingenieros Industriales; Avda. Camilo José Cela, 3; 13071-Ciudad Real (Spain); eustaquio.garcia@uclm.es

⁽²⁾ ETSI Aeronáuticos-UPM. Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid (Spain).

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y desarrollo de un sistema de control on-line del acabado superficial en procesos de torneado automatizado CNC. El sistema de control se divide en dos fases principales: en la primera fase, se diseña un sistema de monitorización del acabado superficial basado en el análisis de las fuerzas de corte del proceso de mecanizado; en la segunda fase, se desarrolla un sistema de control adaptativo en lazo cerrado basado en la información obtenida durante la monitorización del proceso de corte. Este sistema permite mantener el acabado superficial dentro de un rango de valores óptimos mediante el ajuste on-line del avance a través de la comunicación con el PLC del torno CNC. El sistema de control desarrollado logra mantener la rugosidad superficial dentro de los valores preestablecidos en la fase de diseño detectando y corrigiendo errores durante la ejecución del mecanizado.

Palabras clave: Control adaptativo, fuerzas de corte, acabado superficial, sistema de monitorización

ABSTRACT

The primary aim of this study was to design and develop an on-line control system of finished surfaces in automated mechanized process by turning CNC. The control system consisted of two basic phases: during the first phase, surface roughness was monitored through cutting force signals; the second phase involved a closed-loop adaptive control system based on data obtained during the monitoring of the cutting process. The system ensures that surfaces roughness is maintained at optimum values by adjusting the feed rate through communication with the PLC of the CNC machine. A monitoring and adaptive control system has been developed that enables the real-time monitoring of surface roughness during CNC turning processes. The system detects and prevents faults in automated turning processes, applies corrective measures during the cutting process that raise product quality and reliability reducing the need for quality control.

Keywords: Adaptive control, cutting forces, surface finish, monitoring system

1. Introducción

El acabado superficial es un factor muy importante y a veces determinante en la fabricación de componentes mecánicos. El producto final no sólo debe cumplir con las especificaciones dimensionales y geométricas de diseño, sino también garantizar una calidad superficial óptima. La creciente demanda de productos de mayor calidad con la máxima productividad posible, obliga a reducir tiempos de fabricación e inspección, y sus costes asociados. Las tecnologías clásicas de control de calidad basadas en técnicas pos-proceso para la inspección de los productos, trabaja con productos ya finalizados, lo que presenta dos problemas importantes: grandes tiempos de inspección en el control de calidad, y la obtención de piezas defectuosas que en muchos casos son inservibles. Las técnicas de supervisión y control on-line en procesos productivos permiten monitorizar los parámetros de calidad en tiempo real, permitiendo, durante el proceso, la detección de factores que pueden alterar la calidad del producto, como por ejemplo: el desgaste de herramienta, la aparición de vibración o *chatter*, una deficiente elección de la condiciones de corte, etc. Esta detección prematura de anomalías en proceso evita la fabricación de productos que no cumplan con las especificaciones de diseño.

El acabado superficial obtenido en los procesos de mecanizado depende de numerosos aspectos relacionados directamente con las condiciones en las que se produce el proceso de corte: parámetros de corte, geometría de la herramienta, material de trabajo, material de la herramienta, el uso de fluidos de corte, la aparición de *chatter*, la máquina-herramienta, etc. Todo ello supone que el acabado superficial está directamente condicionado por algunos aspectos aleatorios de difícil evaluación, lo que implica que su estimación previa resulta bastante compleja debido a la dificultad de controlar todos los factores que influyen en ella. Se han desarrollado numerosos modelos teóricos para la predicción de la rugosidad superficial [1] como el desarrollado por Whitehouse en 1994 [2]. Este modelo (1) de predicción de la rugosidad media aritmética Ra [μm], depende del avance f [mm/rev] y el radio R [mm] de la punta de la herramienta de mecanizado.

$$Ra = 0,032 \frac{f^2}{R} \quad (1)$$

Otro tipo de modelos empíricos [3,4] estiman la rugosidad superficial a partir de las condiciones de corte del proceso: v (velocidad de corte), f (avance) y d (profundidad de pasada).

$$Ra = C_0 f^a v^b d^c \quad (2)$$

donde C_0 y a , b y c indican el orden el modelo. La estimación del acabado superficial mediante modelos matemáticos a partir de las condiciones de corte presentan serias dificultades predictivas cuando aparecen perturbaciones en el mecanizado como el desgaste de herramienta y el *chatter*. Una importante alternativa para obtener información fiable del acabado superficial es la incorporación de sensores (dinamómetros, sensores de emisión acústica, acelerómetros, etc.) que proporcionen información instantánea del proceso de mecanizado (fuerzas de corte, emisión acústica, vibraciones, etc.) [5,6]. Las componentes ortogonales de la fuerza de corte (F_x , F_y , F_z), la vibración mecánica (a_x , a_y , a_z) y la emisión acústica (EA) se presentan como una fuente ideal de información instantánea del proceso [7-10], capaz de captar en tiempo real cualquier variación transitoria que ocurra en el mecanizado. El procesamiento y caracterización de estas señales permite la obtención de información real y fiable del proceso, permitiendo la estimación de distintos parámetros del proceso y del producto mecanizado [5]. La monitorización del acabado superficial a través de sensores se presenta como una tecnología en-proceso ideal para el diagnóstico de los procesos de mecanizado y la predicción de características finales del producto. La implementación de este tipo de técnicas en los procesos de mecanizado automatizados (CNC) supone una importante mejora en la supervisión y el control del proceso, eliminando los métodos de control de calidad pos-proceso, con una reducción importante de tiempos de inspección y defectos en pieza. La producción automatizada CNC requiere la integración de sistemas de supervisión y control on-line de parámetros del proceso-producto (calidad superficial, desgaste de herramienta, defectos de formas, etc.) en tiempo real.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y desarrollo de un sistema de control on-line del acabado superficial (Ra) en operaciones de cilindrado exterior en procesos de mecanizado automatizado CNC. En los procesos de fabricación, la estimación del acabado superficial en-proceso supone una reducción importante de los tiempos de inspección. En la actualidad, para hacer frente a la demanda de máxima productividad sin errores de producción, es necesario desarrollar sistemas de control adaptativo [11] basados en el ajuste automático de los parámetros del proceso (velocidad de corte, avance y profundidad de pasada). El sistema desarrollado permite el control en-proceso del acabado superficial, ajustando parámetros de corte para obtener la rugosidad media aritmética (Ra) deseada.

2. Experimentación

El diseño de experimentos realizado está basado en un diseño factorial de tres parámetros de corte (v , f , d) a cuatro niveles, como se muestra en la Tabla I. El material utilizado en los ensayos es un acero de uso industrial, acero AISI 1045. Las probetas diseñadas tienen una longitud total de 150 mm, con 50 mm para la zona de amarre de la mordaza, mecanizando 80 mm desde el extremo opuesto a la mordaza con 20 mm de distancia de seguridad para evitar la colisión de los sensores. Todas las probetas se han mecanizado en una única pasada de cilindrado recto exterior en un torno de control numérico *Goratu G CRONO 4S*. Se ha utilizado un portaherramientas *Sandvik MWLNL 2020K08* con una plaquita *Sandvik WNMG080408-PM*. Las condiciones de corte ensayadas están dentro del rango de valores recomendado por el fabricante de la herramienta. El parámetro seleccionado para caracterizar el acabado superficial ha sido la rugosidad media aritmética (Ra). Para la medida de la rugosidad se ha utilizado un rugosímetro *Hommel Tester-T500*. El sistema de adquisición de las señales de fuerzas de corte se compone de una mesa

dinamométrica (Kistler 9121), un amplificador de señales (Kistler 5019B), una interface de conexión BNC (NI 2110), una tarjeta de adquisición de datos (NI PCI 6130), y el software Labview.

Tabla I. Factores y niveles del diseño experimental

Factor	Niveles			
	1	2	3	4
Velocidad de corte, v (m/min)	150	200	250	300
Avance, f (mm/rev)	0.15	0.2	0.25	0.3
Profundidad de pasada, d (mm)	1.5	2	2.5	3

3. Modelo predictivo de rugosidad

Para determinar el modelo predictivo de estimación del parámetro rugosidad superficial Ra , se caracterizan las señales de fuerzas de corte (F_x , F_y , F_z) mediante parámetros en el dominio del tiempo y de la frecuencia que se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Parámetros de análisis de las componentes de las fuerzas de corte

Dominio	Variable	Designación
Análisis en dominio del tiempo	Media F_x	\bar{F}_x
	Media F_y	\bar{F}_y
	Media F_z	\bar{F}_z
	Desviación típica F_x	σ_{F_x}
	Desviación típica F_y	σ_{F_y}
	Desviación típica F_z	σ_{F_z}
Análisis en dominio de frecuencia	Frecuencia de la amplitud máxima F_x	$f_{A_{F_x}}$
	Frecuencia de la amplitud máxima F_y	$f_{A_{F_y}}$
	Frecuencia de la amplitud máxima F_z	$f_{A_{F_z}}$
	Amplitud máxima en frecuencia F_x	A_{F_x}
	Amplitud máxima en frecuencia F_y	A_{F_y}
	Amplitud máxima en frecuencia F_z	A_{F_z}

Los modelos predictivos se obtienen por técnicas de regresión con el 75% de los datos experimentales, utilizando el 25% restante para validación de los modelos. Se analizan modelos de primer y segundo orden, seleccionando el modelo óptimo por el ajuste de los datos experimentales (R^2 -ajustado) y el error relativo medio de predicción ($\bar{\sigma}_r$). El modelo seleccionado (3) es un modelo de segundo orden con un R^2 -ajustado del $\sim 96\%$ y un error relativo medio de predicción $\bar{\sigma}_r$ del $\sim 9\%$.

$$\begin{aligned}
 Ra = & -1,17 + 2,03 \cdot 10^{-2} \bar{F}_x - 2,12 \cdot 10^{-3} \bar{F}_y - 2,53 \cdot 10^{-1} \sigma_x + 2,05 \cdot 10^{-1} A_{F_y} - 9,1 \cdot \\
 & 10^{-6} \bar{F}_x \bar{F}_y - 3,47 \cdot 10^{-4} \bar{F}_x A_{F_z} + 1,67 \cdot 10^{-7} \bar{F}_y^2 + 5,49 \cdot 10^{-4} \bar{F}_y A_{F_x} + 9,38 \cdot 10^{-7} \bar{F}_z^2 - 6,11 \cdot \\
 & 10^{-5} \bar{F}_z \sigma_y + 8,32 \cdot 10^{-3} \sigma_x \sigma_y + 2,84 \cdot 10^{-5} \sigma_y f_{A_{F_z}} + 2,34 \cdot 10^{-2} \sigma_z A_{F_x} - 4,97 \cdot 10^{-3} \sigma_z A_{F_y} - \\
 & 3,47 A_{F_x}^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

En la Figura 1 se muestra el ajuste de los datos estimados con el modelo (3) frente a los datos experimentales obtenidos en los ensayos de validación. Como puede observarse, el modelo presenta un buen comportamiento en la predicción de los datos con un error relativo medio del ~9 %.

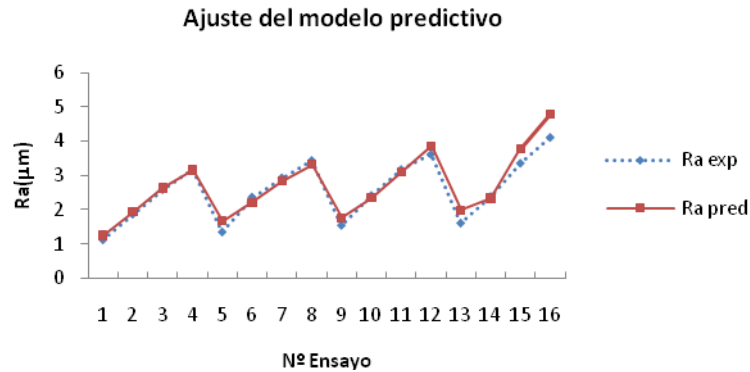


Figura 1. Ajuste del modelo de regresión

4. Diseño y desarrollo del sistema de control

El sistema de control desarrollado (Figura 2) se divide en dos partes: en primer lugar, el sistema de monitorización on-line que predice la rugosidad media aritmética (Ra) en tiempo real, utilizando el la ecuación (3) del modelo de predicción; en segundo lugar, el sistema de control adaptativo, que realiza la comunicación con el PLC del torno CNC, enviando las órdenes de modificación del avance (f) cuando el acabado superficial de la pieza no es el deseado. El sistema se retroalimenta de la información obtenida en tiempo real de la monitorización del acabado superficial (Ra_{pred}).

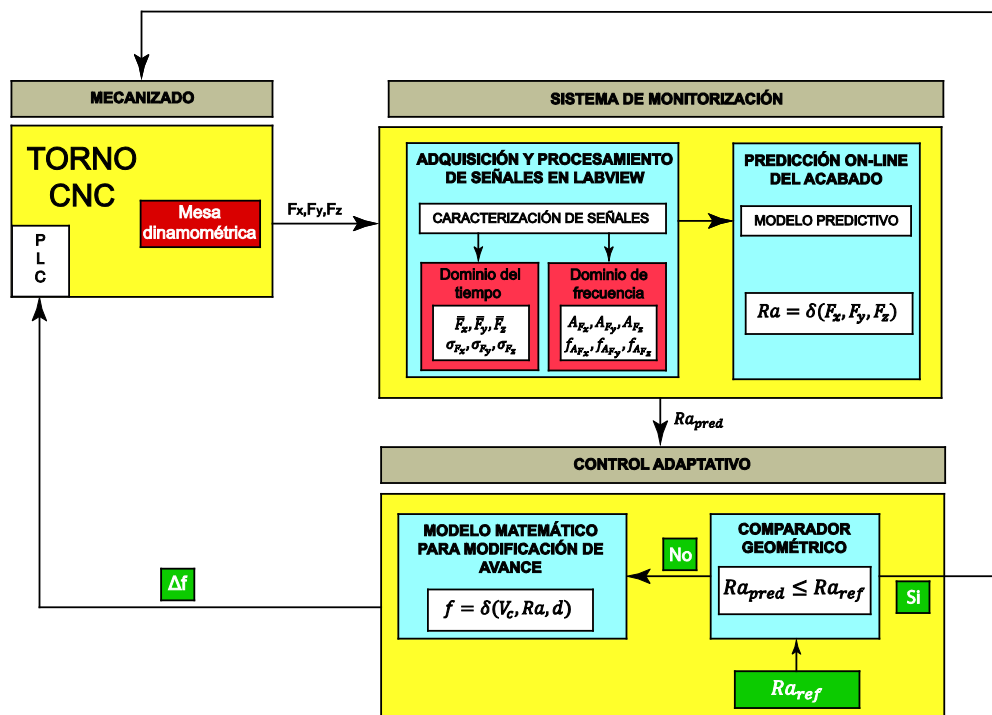


Figura 2. Esquema del sistema de monitorización y control on-line del acabado superficial (Ra)

4.1 Sistema de monitorización on-line

El sistema de monitorización se programa en el entorno *Labview*. En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques programado para el sistema completo de monitorización y control on-line del acabado superficial (Ra). El sistema de monitorización engloba los bloques numerados del 1 al 5: el módulo 1

capta las señales de fuerzas de corte (F_x , F_y , F_z) del proceso de mecanizado en tiempo real, el bloque 2 analiza la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia, el bloque 3 selecciona las variables que se introducen en el modelo predictivo (bloque 4) y finalmente, el bloque 5 presenta los resultados en tiempo real del parámetro R_a .

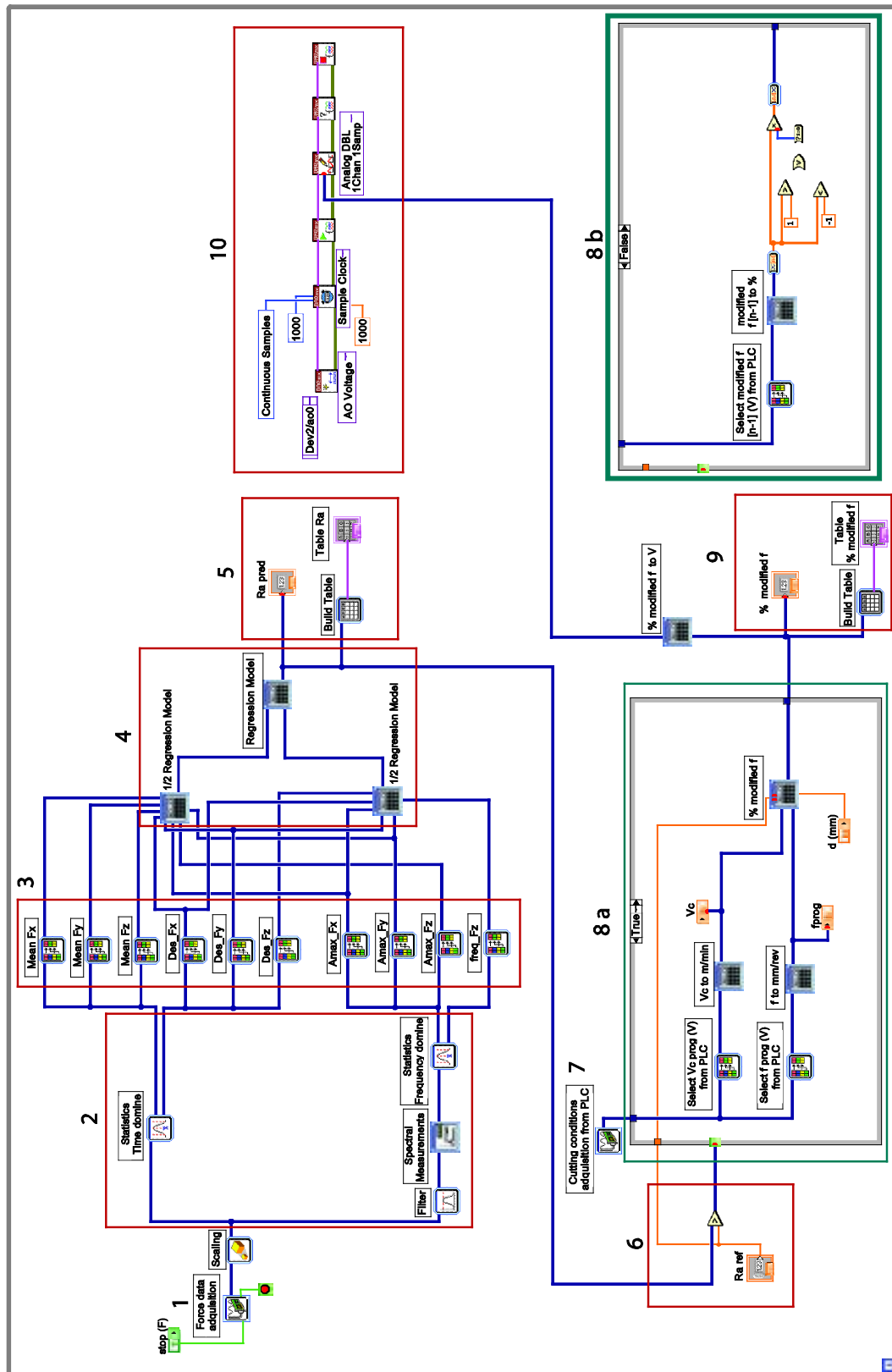


Figura 3. Sistema de monitorización y control del acabado superficial (R_a) desarrollado en Labview

4.2 Control adaptativo del acabado superficial

En la Figura 4 se muestra la influencia de los parámetros de corte en los ensayos experimentales realizados con el mecanizado del acero AISI 1045. El resultado permite establecer que el parámetro de corte más influyente en la rugosidad superficial Ra es el avance (f), aspecto ampliamente estudiado por otros autores [2,3]. Esto motiva, que el control adaptativo desarrollado se base en la modificación en tiempo real del avance (f) a través de la comunicación con el PLC de la máquina CNC.

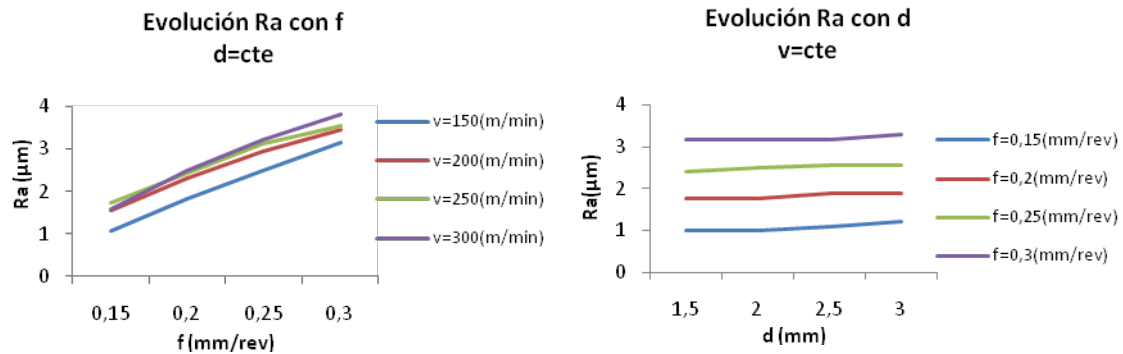


Figura 4. Influencia de los parámetros de corte en el acabado superficial

El control adaptativo está gobernado por un modelo matemático (4) obtenido de los ensayos experimentales realizados, que tiene como variables de entrada: la velocidad de corte (v), la profundidad de pasada (d), y los valores de rugosidad obtenidos experimentalmente (Ra). Una vez implementado el modelo en el sistema de control, los valores numéricos de las variables se obtendrán del sistema de monitorización on-line.

$$f = 0.18 + 6.39 \cdot 10^{-2} Ra - 8.58 \cdot 10^{-4} v + 1.84 \cdot 10^{-4} v^2 + 7.49 \cdot 10^{-2} Ra^2 - 1.15 \cdot 10^{-4} Ra \cdot v - 2 \cdot 10^{-3} Ra \cdot d \quad (4)$$

El control adaptativo se define en los bloques 6, 7, 8, 9 y 10 de la Figura 3. El bloque 6 compara la rugosidad estimada por el sistema de monitorización (Ra_{pred}) con la rugosidad de referencia que se desea obtener (Ra_{ref}). El módulo 7 adquiere los parámetros de corte del mecanizado: avance (f), porcentaje de avance modificado en iteraciones anteriores (% f modificado) y velocidad de corte (v), que se registran en forma de señal analógica procedentes del PLC del torno CNC. El bloque 8 (a y b) es un bucle "case", cuando el sistema está en estado "False" (8b), Ra_{pred} es menor que Ra_{ref} por lo que la rugosidad se encuentra dentro del rango establecido y el torno CNC debe mantener constante el avance f que tiene en ese instante; por el contrario, si Ra_{pred} es mayor que Ra_{ref} el bucle "case" cambia al estado "True". En el bloque 8a se introduce el modelo matemático para la estimación del avance f . El bloque 9 presenta gráficamente el porcentaje de avance modificado en cada instante. Y el bloque 10 envía la señal al PLC de la máquina CNC con la orden de modificación del avance f programado en forma de señal analógica.

4.3 Validación del sistema de control

La validación del sistema de control del acabado superficial se ha realizado con una serie de ensayos de mecanizado. La metodología seguida integra ensayos de torneado con una única pasada de la herramienta de corte, introduciendo en la mitad de la longitud de mecanizado ($L/2$) el valor de referencia de la rugosidad superficial (Ra_{ref}) que debe ser inferior al estimado por el sistema (Ra_{pred}).

Las condiciones de corte seleccionadas para los ensayos de validación y los valores de rugosidad de referencia Ra_{ref} se muestran en la tabla III. Durante estos ensayos se verifica el correcto funcionamiento del sistema. En el momento en que se introduce el valor de rugosidad deseada Ra_{ref} , el sistema determina el nuevo valor del avance f necesario para obtener esta rugosidad y lo comunica al PLC de la máquina, actuando sobre el CNC, modificándolo el avance f en tiempo real. Introducido el valor de referencia Ra_{ref} , el control actúa sistemáticamente durante toda la operación de mecanizado, ajustando el avance f para asegurar el acabado superficial indicado. Se han seleccionado valores de rugosidad de referencia Ra_{ref}

inferiores al valor estimado por el sistema de monitorización, con la intención de que el control actúe modificando el valor del avance f para obtener una mejora del acabado superficial en-proceso.

Tabla III. Ensayos de validación del sistema de control

ENSAYO	v (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Ra_{ref} (μ m)
1	150	0,25	2	1
2	150	0,3	1,5	1
3	200	0,3	1,5	1,5
4	250	0,25	2	1,5
5	300	0,2	2	1

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos en la validación del sistema. La zona A corresponde a la primera mitad mecanizada en la probetas, donde el sistema de control no actúa porque no se ha introducido el valor de referencia Ra_{ref} , únicamente visualizamos los valores estimados por el sistema de monitorización Ra_{pred} , con valores de Ra por encima de las 2 μ m. La zona B corresponde a la segunda mitad de la longitud de mecanizado, donde se introduce el valor de la rugosidad de referencia Ra_{ref} lo que implica la puesta en marcha del sistema de control adaptativo actuando sobre el avance f del CNC de la máquina, reduciendo la rugosidad superficial a los valores de referencia indicados. Para cada uno de los ensayos realizados se observa como el sistema de control es capaz de obtener acabados superficiales muy similares a los valores de referencia con márgenes de error muy pequeños comparados con los valores experimentales.

Tanto el sistema de monitorización (Figura 1) como el sistema de control (Figura 5) permiten mecanizar acabados superficiales con un error relativo medio del $\sim 9\%$ respecto al valor de referencia introducido en el sistema. Esto implica un porcentaje de error similar a los métodos de inspección pos-proceso a través de la medida del acabado superficial con rugosímetros.

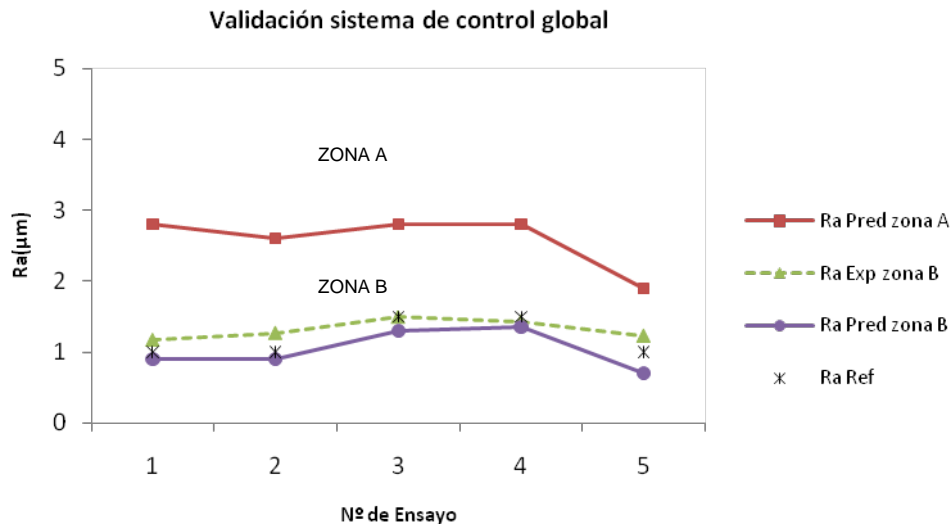


Figura 5. Rugosidad experimental frente a predicha en zonas A y B

4. Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Las fuerzas de corte se presentan como una fuente ideal de información para estimar el acabado superficial en mecanizados por torneado CNC. El modelo de regresión múltiple de segundo orden seleccionado ha mostrado un buen ajuste de los datos experimentales (R^2 -ajustado $\approx 96\%$) y un bajo error relativo medio ($\bar{\epsilon}_r \sim 9\%$).

- Se ha desarrollado un sistema de monitorización on-line en *Labview*, capaz de predecir la rugosidad superficial en tiempo real, sustituyendo la metodología tradicional de control de calidad pos-proceso por un método on-line que permite disminuir los tiempos de inspección empleados.
- El sistema de control adaptativo de la rugosidad superficial (Ra) desarrollado permite mantener la rugosidad superficial dentro de unos márgenes preestablecidos en la fase de diseño. En el instante en el que la rugosidad estimada difiere de una rugosidad de referencia, el sistema envía órdenes al PLC de la máquina CNC con la modificación del avance programado, obteniendo siempre un producto final con la rugosidad superficial deseada.

Este sistema de monitorización y control on-line del acabado superficial permite diagnosticar la rugosidad de las superficies mecanizadas en tiempo real, y el control adaptativo en lazo cerrado del proceso de corte manteniendo el acabado superficial dentro de las especificaciones de diseño. Esto se consigue actuando sobre el PLC de la máquina CNC a través de modificación de la velocidad de avance f . Esto permite implementar un sistema de control on-line sin necesidad de emplear métodos clásicos pos-proceso, lo que implica tiempos de inspección más reducidos, y la detección y corrección de errores durante la ejecución del producto, ahorrando tiempos de inspección y costes derivados de productos defectuosos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha a través del proyecto de investigación Ref. PBI08-0288-3732.

6. Referencias

- [1] D. Karayel, *Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network*, Journal of Materials Processing Technology (2008), Journal of Materials Processing Technology, In Press, Available online.
- [2] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol, UK. 1994.
- [3] M. C. Cakir, C. Ensarioglu, I. Demirayak, *Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material*, J. of mat. proc. technology 209 (2009) 102–109.
- [4] I. Asiltürk, M. Çunkas, *Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method*, Expert Systems with Applications 38 (2011) 5826–5832.
- [5] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, *Advanced monitoring of machining operations*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 717–739.
- [6] S.Y. Liang, R.L. Hecker, R.G. Landers, *Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art*, Transactions of the ASME 126 (2004) 297–310.
- [7] P.J. Núñez, J. Simao, E.M. Rubio, J.L. Rincón, *Influence of the machining parameters on workpiece roundness error during turning operation*, Material Science Forum 526 (2006) 127–132.
- [8] D. Shi. N. N Gindy. *Development of an online machining process monitoring system: Application in hard turning*. Sensors and Actuators 135 (2007) 305–414.
- [9] E. García-Plaza, P.J. Núñez, A.R. Martín, R. Trujillo, C. de la Cruz, *Design of an on-Line diagnostic system of finished surfaces in an automated mechanized process by CNC turning*, Proceedings of American Institute of Physics 1181 (2009) 141–150.
- [10] E. García-Plaza, P.J. Núñez, A.R. Martín, E. Beamud, C. de la Cruz, *On-line diagnosis and monitoring of roundness defects in CNC machining processes*, International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 3-5/6 (2010) 357–367.
- [11] E. D. Kirby, J. C. Chen, J. Z. Zhang, *Development of a fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operations*, Expert Systems with Applications 30 (2006) 592–604.